

エグゼクティブサマリー

ナノテクノロジー・材料分野は、物質科学、量子科学、光科学、生命科学、情報科学、数理科学といった基礎科学をベースに、ナノスケールで生ずる現象を取り扱う科学として発展してきたナノサイエンスを土台に置いている。ナノサイエンスという土台の上に、精密機械加工や積層造形などの製造加工技術、高分解能顕微鏡などサブオングストロームの分解能におよぶ計測、第一原理電子状態計算による物質構造と機能の予測、シミュレーションやモデリングによる解析技術などを柱とした共通基盤科学技術が構築される。その技術を用いて元素戦略や分子技術、マテリアルズ・インフォマティクス、界面・空隙制御、フォノンエンジニアリングといった物質と機能の設計・制御技術が確立されている。そして、デザインされた物質・機能を組み合わせることで新たなデバイス・部素材を開発し、環境・エネルギー、ライフ・ヘルスケア、情報通信（ICT）・エレクトロニクスなどの多様な分野の先端を拓く、異分野融合の技術領域としてナノテクノロジーは特徴付けられる。

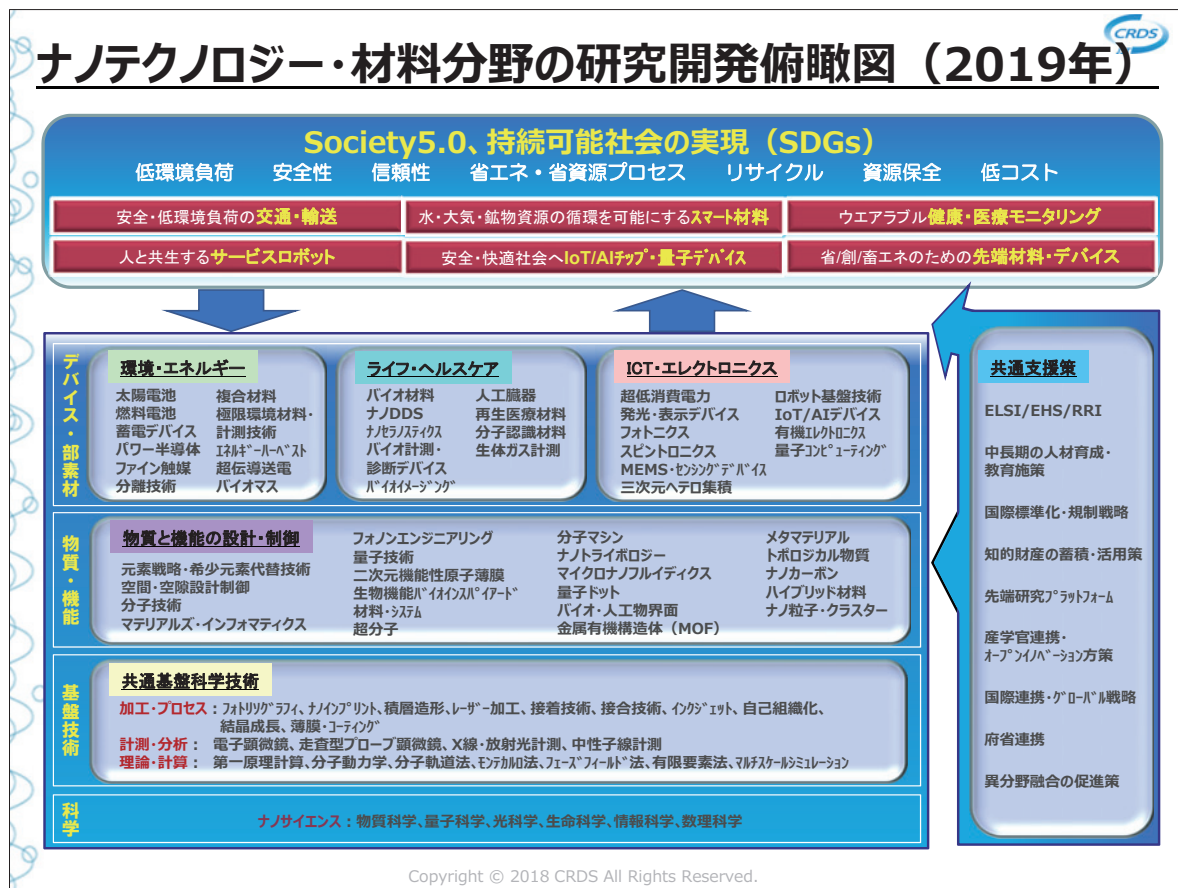


図0 ナノテクノロジー・材料分野の研究開発俯瞰図(2019年)

2000年初頭に世界各国でナノテクノロジーの国家政策が開始されてから、20年が経過しようとしている。この間、ナノテクノロジーは技術の先鋭化、融合化、そしてシステム化へと向かう流れのなかにあり、2010年代以降は特に異分野技術の融合化と、製品化・社会実装を指向した技術のシステム化が強調されるようになってきた。技術進展の結果、ナノテクによって

実現された多くの製品が生み出され、我々の社会に大きな便益をもたらしている。

一方、ナノテクノロジー・材料科学技術の進歩と実用化に伴って生み出される新規物質や新製品の健康・環境への影響、倫理面の取扱い、リスクの評価・管理、そして標準化が国際的課題になっている。新規なナノ材料は、従来の材料とは異なるナノ構造ゆえの新物性を持つことがあることから、未知のものとして適切な評価を行うことが求められている。しかしながら、従来の化学物質のように組成だけでは分類することができないため、サイズ、形状、表面状態など多岐にわたる特性を考慮する必要がある。科学的評価には膨大な時間・資金・設備等リソースを要するため、国家主導や国際協調の枠組みのもと、環境・健康・安全（EHS : Environment, Health and Safety）の科学的側面からと、倫理的・法的・社会的側面（ELSI : Ethical, Legal and Social Issues）からの取り組みがなされている。近年特にナノ材料を使用した製品の実用化が進むにつれ、各国・地域単位で規制・制度面の整備が顕在化してきている。ナノ材料とその関連製品のリスクを低減し、恩恵を社会が広く享受するためには、健全な国際市場での流通が欠かせず、そこでは、固有の用語、評価試験方法、リスク評価法などの多方面にわたる国際標準化が重要となっている。

世界で最初にナノテクノロジーの国家イニシアティブ（National Nanotechnology Initiative : NNI）を開始した米国では、これまでに 270 億ドルを投資している。2018 年度以降、予算は減少傾向にあるものの、Nanotechnology Signature Initiatives（NSIs）をはじめとする 5 項目から成るプログラム構成エリア（Program Component Areas : PCA）に対して戦略的に予算配分がなされている。一方、ムーアの法則に従って高性能化を進めてきた半導体も微細化限界が顕在化してきており、微細化に頼らない新たな半導体高性能化の姿を追求する Electronics Resurgence Initiative（ERI、エレクトロニクス復興イニシアティブ）、量子コンピュータの最近の急速な研究開発の進展にドライブされ、量子技術全体の新たな可能性を追求する National Quantum Initiative（NQI、国家量子イニシアティブ）などが立ち上がり、今後、政策として重点化されていくと予想される。欧州 Horizon2020 においては、3 つの優先領域（① Excellent science、② Industrial leadership、③ Societal challenges）が設定されている。①の中では、10 年間で総額 10 億ユーロが投資される Future & Emerging Technologies（FET）として「Graphene Flagship（2013 年～）」「Human Brain Project（2013 年～）」に続き 2018 年から「Quantum Flagship」が開始されている。②では Leadership in Enabling and Industrial Technologies（LEITs）の中の Key Enabling Technologies（KETs）としてナノテクノロジーや先端材料技術が位置づけられている。次期フレームワークである Horizon Europe の検討状況や BREXIT の影響など、欧州の今後の動きにも注目すべきである。アジア地域では、特に産業界・学術界とも中国の台頭が目立っている。中国では、ナノテクノロジー・材料分野のほとんどの部分をカバーする 10 の重点分野の国内外の市場シェア獲得と部材の自国生産を目指した「中国製造 2025」が推進されている。その結果、半導体、人工知能（AI）、量子技術などの最先端技術や先端材料の研究開発において、特に米中間の競争が激化している。このことはわが国における研究開発計画にも大きく影響を及ぼす可能性を秘めている。また、台湾・韓国・シンガポールを始めとしたアジア諸国においても、ナノテクノロジーの研究開発拠点を築き、世界の研究開発人材や資金を吸引しようとしている。

わが国においては、これまで物質・材料研究を積極的に進めてきたこともあり、新材料の開

発では世界に先行する場面も多く、部素材の基幹産業を支え、新しい産業を生み出してきた歴史がある。光触媒、リチウムイオン電池、永久磁石、青色LED、ハードディスクの磁気ヘッドなど、わが国が材料・デバイスの重要な発明に深く関わった事例が多数存在している。

そのような背景もあり、わが国の部素材産業では、機能性材料分野を中心に市場規模が小さくて世界的に高いシェアを確保している製品を多数有する。部素材産業全体を面で見ただけには大きな市場を獲得し、競争力を維持していると言え、今後も部素材に対する基礎研究から開発・製品化まで力を入れていくことが望まれる。一方で、従来はわが国に強みがあった液晶用フォトリソグラフやカラーフィルムなど一部の液晶ディスプレイ材料やリチウムイオン電池に関しては、中韓の急迫により大きくシェアを低下させていることにも目を向ける必要がある。

一般に、物質・材料の発見から応用技術が開発され、試作品の完成、信頼性の確保、量産化技術の開発を経て世に出るまでには通常15～30年といった長い年月を要するが、グローバルな開発競争が激化している昨今、研究開発のスピードが要求される場面が多くなっている。その中でわが国がこれまでのように先導的な役割を果たせるかどうかは余談を許さない状況になっている。その意味では、計算科学や情報科学を駆使して物質・材料の設計を効率的に進めようとするマテリアルズ・インフォマティクスが今後も材料開発においては重要な基盤技術になると予想される。

いよいよIoT/AI時代が全盛を迎えようとしている中、サイバーフィジカルシステム（CPS）におけるサイバー空間のソフトウェアとフィジカル空間（現実空間）のハードウェアの両者の融合が重要になるが、サイバー空間の重要な構成要素である高性能コンピュータ、大容量情報ストレージ、さらにはフィジカル空間との接点となるセンシング、ネットワーキングは、半導体を中心とするナノエレクトロニクス機器によって構成されている。我々の身の回りの機器に埋め込まれるIoTデバイスは、多様なセンシング機能と情報をクラウド側に送信するためのネットワーク機能、また使われる場面によっては自らを動作させるための電力をその場で獲得するエネルギーハーベスト機能を具備する。ロボットや自動車などは即時の情報処理やアクションが必要である。また、ネットワークの負荷低減のために、大量のデータ情報の事前処理が必要な場合もある。このようなときはIoTデバイス自身にAIをも含む高度のコンピューティング機能が搭載されるようになる。AIは従来のコンピュータでは困難な大量の画像・音声・動画処理、AR/VR、自然言語処理、最適化・推論などの領域で力を発揮する。これらの領域におけるAIへの要求は高まり続け、これまでのフォン・ノイマン型のコンピューティングを超える新たなアルゴリズム、それを実行するハードウェアへの期待が世界的に高まっており、この解決がナノテクノロジー・材料技術の発展に求められている。これまでこれらの進展を支えてきた半導体の微細化が限界を迎えつつあるなかで、ポストムーア時代を担う新技術体系の必要性は広く認識されている。生物が実現している低エネルギーでの情報処理の仕組みを取り込もうとするニューロモルフィックコンピューティングや、量子力学の原理に則り基本素子を動作させ、現状のコンピュータでは実質的に解く事が難しい複雑な問題に解を与える量子コンピューティングなどがその候補とされる。特に、ここ数年の間に前述の米国NQTをはじめ、量子コンピューティングに関する国家戦略や大型プロジェクトが世界各国で立ち上がる中、ナノテクノロジー・材料科学技術からの同分野への寄与に対する期待も高まっている。

一方、ビッグデータを活用した情報科学技術の進展は、ナノテクノロジー・材料の研究開発

方法自体にも大きな影響を与え始めており、米国の **Materials Genome Initiative** に代表されるデータ駆動型材料設計（マテリアルズ・インフォマティクス）はもはや全ての材料開発の基盤技術として定着し、最近ではデータ駆動型プロセス設計（プロセス・インフォマティクス）への挑戦も始まりつつある。近年のコンピュータの能力向上は、材料、部品、さらには複合システム品の設計開発を行うシミュレーション技術の可能性を大きく広げ、量子力学が支配するナノスケールの物質構造から最終製品に近いマクロスケールの複合システム品までを一貫して設計するマルチスケールシミュレーションが徐々に実現してきている。さらに、これらデジタル化された設計データを基に、目的の構造物を自在に作製する **3D プリンティング** 技術の進歩も著しく、情報科学技術の進展がナノテクノロジー・材料技術を含むものづくり全般に革新をもたらし始めている。

米欧中を中心として、ここ数年で、**IoT/AI** 時代を支配する **AI・半導体・量子技術** などの技術覇権争いが顕在化している中、それらを支えるナノテクノロジー・材料分野に対する社会的期待は益々高まりつつある。今回の **2019 年版** では、前作 **2017 年版** の「**IoT/AI** 時代を牽引するナノテクノロジー・材料」という立場を踏襲しつつ、最新情報や技術動向をアップデートし、**SDGs** に代表される持続可能社会実現に向けてナノテクノロジー・材料技術がどう貢献できるのかの視点も含めて記述した。報告書第 1 章では、こうした内外の研究開発動向の全体像と将来の展望、特にこの分野における日本の課題とグランドチャレンジについて、**CRDS** における関連ワークショップやインタビュー調査にもとづき俯瞰的にまとめている。ナノテクノロジー・材料の研究開発俯瞰図を新たに見直し、そこから **32** の主要な研究開発領域を抽出した。そのうえで、現代社会にとって重要な **6** つの社会的ニーズの特定、およびそれらのニーズを解決するために戦略的に取り組むべき「**10 のグランドチャレンジ**」について記述した。第 2 章では **32** の主要研究開発領域について、各々 **10** ページ程度を割り、当該領域の意義、歴史的背景から現在の先端技術動向、今後の科学技術的課題、国際比較（日米欧中韓）の結果についてそれぞれ概略をまとめている。本報告書は、検討過程において総勢 **170** 名を超える産学官の専門家の協力によって、情報・意見を収集し、ワークショップ等での議論を重ねた上で、**CRDS** の視点から見解をまとめたものである。

Executive Summary

The nanotechnology/materials field is founded on nanoscience which has developed as a science handling phenomenon occurring at the nanoscale, based on basic science fields such as material science, quantum science, optical science, life science, information science, and mathematical science. Common basis of science and technology including manufacturing techniques such as precision machining and additive manufacturing, measurement technology spanning to sub-angstrom resolution represented by a super-high-resolution electron microscope, prediction of material structure and functions using the first principle electronic state calculation, and analysis techniques by simulation and modeling is built based on the nanoscience.

Design and control techniques for materials and their functions such as element strategy and molecular technology, materials informatics, control of interface and gap in materials, phonon engineering have been established using above-mentioned nanotechnology. Nanotechnology is also characterized as a technology area of fusion which will open the frontiers of diverse fields such as environment and energy, life and health care, information communication (ICT) and electronics by developing new devices combined with the designed materials with useful functions.

Twenty years have elapsed since the start of national policies for nanotechnology in various countries around the world in the beginning of 2000. In this period, nanotechnology is in the trend toward technological development, convergence, and systemization. As a result of these progress, many products based on nanotechnology have been created and commercialized. They are providing a large benefit to our society.

Meanwhile, impact on the health and the environment of new materials and new products generated through the technological progress and practical application of nanotechnology and materials, handling of their ethical aspects, evaluation and management of their risks, and their standardization are becoming international issues. Since new nanomaterials may have new physical properties originated from their nanostructures different from conventional materials, it is required to perform appropriate evaluation for them as unknown materials. However, as they cannot be classified by composition alone as in conventional chemical substances, diversified features such as size, shape, surface structure, and others have to be considered. Since scientific evaluation of these features requires huge amount of time, money, equipment, and manpower, it is undertaken by industry, academia and government in the world collaboratively under the framework of national leadership and international cooperation. There are such efforts from the scientific aspect of the environment, health, safety (EHS: Environment, Health and Safety) and from the ethical, legal and social (ELSI: Ethical, Legal and Social Issues) aspect. As the practical use of products made of nanomaterials has progressed especially in recent years, the development of regulatory and institutional aspects has become obvious in each country and region. In order to reduce the risk of nanomaterials and related

products and to enjoy their benefit widely in the society, it is essential for nanomaterials and related products to circulate in a healthy international market, where international standardization over various aspects such as specific technological terms, evaluation and test methods, risk assessment methods, etc. has become important.

The United States, which launched national technology initiative (National Nanotechnology Initiative: NNI) before each country, has invested cumulatively \$ 27 billion so far. Although the budget has been on a downward trend since 2018, the budget has been strategically allocated to the Program Component Areas (PCA) consisting of five items including Nanotechnology Signature Initiatives (NSIs).

Meanwhile, since the miniaturization limit has become obvious in semiconductor devices that advanced according to Moore's Law, the Electronics Resurgence Initiative (ERI, Electronics Recovery Initiative (ERI) started, which pursues the appearance of new high-performance semiconductor chips that does not rely on miniaturization. The National Quantum Initiative (NQI, National Quantum Initiative), which is driven by the recent rapid development of quantum computers and pursuing new possibilities of the quantum technology, has been launched and will be emphasized as a policy from now on.

In Horizon 2020 of EU, three priority areas are set up, which are ① Excellent Science, ② Industrial Leadership, ③ Societal Challenges. In the priority area of Excellent Science, following the "Graphene Flagship (2013 ~)" and "Human Brain Project (2013 ~)" as Future & Emerging Technologies (FET) with a total budget of 1 B € being planned to be invested in 10 years, "Quantum Flagship "has been started as a third FET program from 2018. In the priority area of Industrial Leadership, nanotechnology and advanced material technology are positioned as Key Enabling Technologies (KETs) in Leadership in Enabling and Industrial Technologies (LEITs). The planning results of Horizon Europe as a next research and development framework in Europe and also the action of BREXIT will have a large influence on the research and development of Europe in future.

In Asia, the progress of China is particularly prominent in high tech industries and academic field. China launched the "Made in China 2025" , aiming to achieve domestic and international market-share targets in ten industrial areas which cover most areas of nanotechnology and materials, and attaining self-reliance for key components. As a result, the competition of the research and development in the advanced technologies of semiconductor, AI, quantum technologies, and advanced materials is becoming fierce, particularly between China and the USA. It will affect the research and development planning in Japan largely.

In other countries in Asia including Taiwan, Korea, Singapore are also building a research and development bases of nanotechnology and are trying to attract human resources and funds from all over the world.

In Japan, materials research has been intensively conducted for a long time and there are many achievements preceding the world in the development of new materials, which has supported and created the core industry of key materials and device components.

We can raise many examples such as TiO_2 photocatalyst, lithium ion battery, NdFeB permanent magnet, GaN blue LED, TMR head of hard disk, carbon nanotubes and so on, whose inventions and pioneering works were done in Japan.

Under such a background, there are many industrial areas in Japan that obtain a high market share worldwide even though with a small market size, mainly in the field of functional materials. Nevertheless, in terms of the entire material industry as a whole, Japan is keeping a large market-share worldwide, and it is strongly hoped to continue its efforts on basic research, development, and commercialization of materials in order to maintain its competitiveness. We should be also aware of the fact that the market share has declined significantly due to the rapid progress of east Asian countries with regard to lithium ion batteries and some liquid crystal display materials, such as photoresists for liquid crystals and color films, although Japan had traditionally technical advantages in these fields.

In recent years, since global competition for technology development is intensifying, it is strongly required to accelerate the speed of research and development even in the materials. A long period of time, typically 15 to 30 years is needed from the discovery of novel materials to social implementation through many time-consuming processes of completing prototypes, securing their reliability, and developing mass-production technologies. In this sense, it is expected that materials development using data science will continue to be an important basic technology for development of novel materials, which will efficiently advance the design of materials by making full use of computational science and information science.

As the IoT/AI era is about to arrive at its peak, and the integration of cyber space software and physical space (real space) hardware in Cyber Physical System (CPS) becomes important. It should not be forgotten that high-performance computer, large capacity information storage, which are important components of cyberspace, sensing and networking as interface points with physical space, are depending on nano-electronic components composed of mainly semiconductor devices. IoT devices embedded in our surrounding require sensing function and networking function for sending information to the cloud side, as well as the energy harvesting function that acquires the electric power from the environment depending on the scene being used. In the operation of robots and autonomous car driving, instantaneous information processing and actions are required. In such a case, the IoT device itself will be equipped with advanced computing functions including AI, which exerts its strength in areas such as massive image / sound / video processing, AR/VR, natural language processing, optimization / reasoning, which are difficult with conventional computers.

The demand for AI in these areas continues to be increasing, and expectations for new algorithms that exceed the von Neumann type computing and the hardware that carries out it are increasing worldwide, and nanotechnology is expected to fulfil these demands. While the miniaturization of semiconductors that have supported these

developments has reached the limits, the need for a new technology to bear the post-Moore era is widely recognized. One of the candidates for these novel computing technologies is the neuromorphic computing which captures the information processing mechanism at extremely low power consumption realized by human's brain, and the other candidate is the quantum computer. This gives a solution to the complicated processing practically difficult to solve at the current computer by operating basic elements to work in accordance with the principle of quantum mechanics. As the quantum computing related national strategies and large-scale projects for quantum computing have been launched in advanced countries during the past few years, including the above-mentioned US NQI, expectations are increasing for contribution from nanotechnology/materials science and technology.

On the other hand, the progress of information science and technology utilizing big data has begun to exert a great influence on the research and development method even in the nanotechnology and materials. Data-driven materials design (Materials Informatics) represented by Materials Genome Initiative in the United States already becomes a fundamental technology for materials development in general, and recently challenge to data driven process design (process informatics) also started. Recent progress of computer performance has greatly expanded the possibilities of simulation technology for designing and developing materials, devices, and even complex systems, and multi-scale simulation is being developed starting from the simulation of the nanoscale structure dominated by quantum mechanics. These techniques may enable to design macroscale complex systems up to the final product. In addition, the progress of fabricating target structures on demands using 3D printing technology based on these digitized design data is striking. As is described above, the progress of information science and technology has brought a great impact on the manufacturing as a whole including nanotechnology and material technology.

In the last few years, mainly in the US, Europe, and China, technological competition of AI, semiconductor, quantum technology, etc. that are expected to play a key role in the IoT/AI era has become fierce, and a technological expectation for the nanotechnology and materials is increasing to support them. In this 2019 edition, we will update the latest information and technology trends regarding nanotechnology and materials, while following the position of the previous work of the 2017 edition and adding the viewpoint of how nanotechnology and materials can contribute for the realization of a sustainable society represented by SDGs.

In the first chapter of the report, we summarize the overview of these trends and prospects in domestic and foreign research and development, and describe especially issues in Japan and grand challenges in this field derived through related workshops and interview surveys organized by CRDS. We reexamined the panoramic view of research and development of nanotechnology and materials and extracted 32 major research and development areas from there. In addition, we described six social needs that we are facing and the "10 Grand Challenges" to strategically address to solve those needs.

In chapter 2, we will allocate about 10 pages for each of the 32 major research and development areas, which summarizes surveys on the significance of the area, historical background, current advanced technology trends, future science and technology issues, and international comparisons (Japan, the US, Europe, China and Korea). In these review processes, we gathered information and opinions with the cooperation of about 170 experts from industry, academia and government, made intensive discussions at workshops and summarized the views from the standpoint of CRDS.